

PROPOSTA E VERIFICAÇÃO DE SOLUÇÕES VISANDO A UMA CONSTRUÇÃO COM SALDO NULO DE EMISSÕES DE CO₂

PROPOSAL AND ASSESSEMENT OF NET-ZERO CO₂ EMISSIONS IN CONSTRUCTION

António Alberto de Jesus Murta¹, Humberto Varum², Jorge Tiago Queirós da Silva Pinto³

¹Mestre em Engenharia Civil, Assistente Convidado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), Quinta de Prados. 5001-801 Vila Real, Portugal. Telf: +351 259 350 356; Fax: +351 259 350 356;

E-mail: murtadesigns@yahoo.com.br

²Doutorado em Engenharia Civil, Professor Associado, Universidade de Aveiro (UA), Departamento de Engenharia Civil, Campus Universitário de Santiago. 3810-193, Aveiro, Portugal. Telf: +351 234 370 938; Fax: +351 234 370 094;

E-mail: hvarum@ua.pt

³Doutorado em Estruturas de Engenharia Civil, Professor Auxiliar, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), Quinta de Prados. 5001-801 Vila Real, Portugal. Telf: +351 259 350 356; Fax: +351 259 350 356;

E-mail: tiago@utad.pt

RESUMO

O desenvolvimento deste trabalho teve como objectivo desenvolver uma solução ou processo construtivo que reduzisse e, no limite, até eliminasse a emissão de gases nocivos para a atmosfera. Desenvolveu-se um conjunto de propostas hierarquizadas de vectores que contribuem para a redução de emissões de CO₂: 1- utilização de materiais naturais (madeira, terra, pedra), 2- a reutilização de materiais construtivos, 3- método de quantificação do sequestro de carbono para os materiais naturais e 4- a plantação de árvores, com o intuito de compensar a emissão de CO₂ proveniente dos materiais de construção de um edifício e de toda a actividade construtiva associada.

Considerou-se como caso de estudo uma moradia unifamiliar, definiram-se três soluções construtivas, comprovaram-se as vantagens da opção de utilização de materiais naturais comparativamente com uma solução em betão armado e quantificaram-se os benefícios que se podem alcançar com a utilização de materiais naturais e com a reutilização de materiais de construção.

Adicionalmente, analisou-se o sequestro de carbono nos materiais e analisou-se ainda o impacto equivalente de cada solução construtiva em quantidade de árvores abatidas necessárias para saldar as emissões de CO₂ associadas.

Palavras-chave: Zero Emissões de CO₂; Sequestro de CO₂; Materiais Naturais; Reutilização de Materiais; Soluções Construtivas.

ABSTRACT

The aim of this study was the development of solutions and constructive processes that could reduce and, ultimately, eliminate the emission of harmful gases into the atmosphere. A series of proposals were developed, in a hierarchical orientation of vectors that may contribute to reduce CO₂ emissions: 1- using natural materials (wood, earth, stone), 2- the reuse of building materials, 3- applying the method of carbon sequestration quantification from the natural materials and 4- trees planting in order to offset the CO₂ emissions from the construction materials of a building and all associated construction activities.

It was considered a case-study corresponding to a common family dwelling, were set up three constructive solutions, proved the advantages for the adoption of natural materials in comparison with a reinforced concrete solution and were also quantified the benefits achieved with the use of natural materials, and reused construction materials.

Additionally, was analyzed the amount of carbon sequestration of the materials applied and was also analyzed the environmental impact of each equivalent constructive solution in a fallen tree amount necessary to compensate the associated CO₂ emissions.

Keywords: Zero CO₂ emissions, CO₂ sequestration; Natural Materials; Materials Reuse; Building solutions.

1. INTRODUÇÃO

Em Portugal, os edifícios mais antigos são maioritariamente compostos por pedra, terra e madeira. As principais técnicas construtivas tradicionais em Portugal que recorreram ao uso da terra são a taipa, o adobe e o tabique. Estas técnicas caíram rapidamente em desuso quando da introdução do betão armado e das alvenarias de tijolo cerâmico (Carvalho et al., 2008).

No parque habitacional português os edifícios executados com esses materiais frequentemente revelam falta de manutenção e conservação. As manifestações patológicas podem até resultar no colapso progressivo, parcial ou até mesmo total dos edifícios (Pinto et al., 2002).

A taipa é um método rudimentar de execução de elementos verticais com utilização de terra e com recurso a um elemento de compactação. O adobe é um bloco de terra enformado e deixado a secar até solidificar. O tabique é uma técnica que consiste na utilização de tábuas dispostas na vertical, com elementos de ligação que as mantêm justapostas e com recobrimento de terra com o objectivo de proteger a madeira.

Intervenções regulares de manutenção e de conservação são, por isso, fundamentais para evitar a degradação acelerada dos edifícios conforme (Faria et al., 2008).

Em intervenções de reabilitação, um aspecto a se ter em conta é a classificação e quantificação dos resíduos de forma a aferir a quantidade de materiais provenientes das demolições e, ainda, investigar o tipo e a quantidade de materiais que podem ser reutilizados. Diversos estudos foram já realizados neste âmbito, referindo-se, a título de exemplo, Bernardes et al. (2008), Miranda et al. (2009) e Buson et al. (2009).

Baseado no conceito “informar para prevenir”, foi lançado um trabalho de investigação na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), em parceria com a Universidade de Aveiro (UA), com o principal objectivo de consciencializar a população para a urgência de adoptar uma atitude sustentável em todas as actividades da sociedade e, em particular, nas associadas à indústria da construção. Nessa linha, esse projecto tem-se debruçado em quatro pilares principais, que são: o uso eficiente da energia, o planeamento urbano sustentável, a gestão eficiente dos recursos hídricos e a construção de habitações com base em materiais e soluções sustentáveis.

É no domínio da construção sustentável de habitações que se insere o trabalho apresentado neste artigo, com o estudo de propostas que possam reduzir, ou até mesmo suprimir, a emissão de gases nocivos para a atmosfera, como o CO₂ (oriundos dos processos de transformação das matérias-primas em materiais de construção), um dos parâmetros mais utilizados na avaliação do impacto ambiental das construções.

A obtenção dos materiais correntes para a construção requer, geralmente, uma quantidade considerável de energia durante as várias fases do seu ciclo de vida (extracção, transporte, transformação, aplicação, uso, demolição e eliminação ou reciclagem), associada à libertação de gases nocivos para a atmosfera. Neste trabalho estuda-se a viabilidade de aliar a aplicação de materiais naturais, que são materiais que se obtêm da natureza sem transformação e com pouco trabalho de preparação para utilização, disponíveis localmente, a métodos construtivos que exijam um reduzido consumo de energia na sua aplicação e, implicitamente, um baixo teor de emissão de gases poluentes para a atmosfera. Nesse sentido, estudou-se a aplicação de blocos de adobe em terra e de diversos elementos em madeira na construção de habitações unifamiliares correntes, que, conforme estudado por Murta et al. (2010), apresenta-se como uma solução muito vantajosa do ponto de vista económico e ecológico, quando comparada com soluções correntes em betão armado. Adicionalmente, foram analisados métodos que possibilitem a redução da necessidade de matéria-prima para a produção dos materiais de construção. Um dos métodos possíveis e que será abordado neste estudo consiste na reutilização de materiais

provenientes de demolições, em particular dos materiais com uma necessidade limitada de operações de transformação em novo material de construção, contribuindo ainda para a redução de resíduos na construção.

Neste trabalho a solução denominada de solução “PBTPMN” é composta por paredes em blocos de terra e pavimentos constituídos por tábuas de soalho e vigas de suporte em madeira nova. Esta madeira considerou-se proveniente de reflorestamento como modo de protecção das florestas nativas. A outra solução é denominada de solução “PBTPMR” e é composta igualmente por paredes em blocos de terra e pavimentos em madeira, no entanto a madeira desta solução é reaproveitada, proveniente da demolição de edifícios.

Além das soluções referidas, e que são inerentes à construção propriamente dita, foram equacionadas medidas indirectas que possam ser utilizadas quando o nível de redução de emissão de CO₂ não é alcançado ou como medidas suplementares para a obtenção de uma construção com saldo nulo de emissão de CO₂, denominada neste trabalho de “Construção CO₂ Zero”, do ponto de vista dos sistemas de estudo.

Nesse contexto, a obtenção da “Construção CO₂ Zero” significa uma neutralidade na degradação do meio ambiente, podendo até beneficiá-lo com uma pequena retenção de CO₂ ao longo da vida útil do edifício.

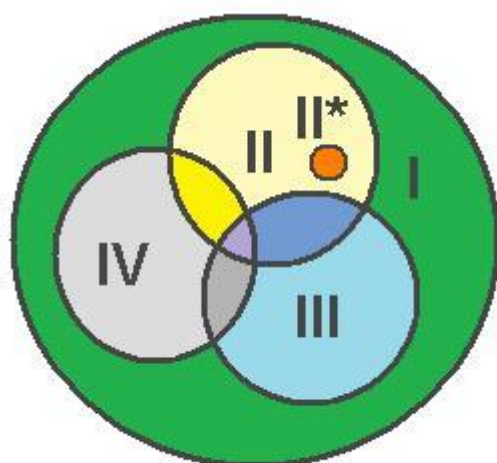
Será efectuada uma breve referência à temática da sustentabilidade na construção, onde se apresentarão um diagrama de interligação da sustentabilidade e uma hierarquia das propostas de redução da emissão de CO₂. Um caso de estudo explicitará os conceitos aqui apresentados.

Em todo o estudo será considerado o caso de uma construção portuguesa, em tudo que à construção diz respeito, nomeadamente processos e materiais construtivos. Podem, no entanto, as soluções ser aplicadas a outros lugares, e não somente em Portugal? A resposta a esta questão é afirmativa, mas com algumas reservas.

Foram utilizados, sempre que possível, dados, conceitos e valores globais que possibilitem a aplicação deste estudo sem reservas em qualquer local existente. Por outro lado, ao longo do estudo serão feitas referências a factores que poderão ditar a exclusão de alguns países/zonas na adopção das soluções aqui preconizadas. São factores como madeira nova (exclui países/zonas áridas), madeira reaproveitada (exclui países/zonas desertas), sequestro de carbono (exclui países/zonas sem recurso a madeira) ou “pulmão verde” (exclui países/zonas sem espaço para plantação de árvores), entre outros.

2. SUSTENTABILIDADE

A Terra deve ser encarada como um ecossistema complexo e susceptível, cujo equilíbrio requer atenção urgente. Considerou-se que as ameaças principais para a sustentabilidade do nosso planeta são, por ordem de importância, a indústria (uma vertente da manifestação do comportamento humano), o comportamento humano (na generalidade) e ocorrências naturais (erosão, cheias, fogos florestais, erupções vulcânicas, entre outras). Tais ameaças podem estar interligadas de múltiplas formas, de acordo com o diagrama de interligação que se apresenta na Figura 1.



Legenda:

- I – Meio ambiente
- II – Indústria
- II* – Indústria da construção
- III – Comportamento humano
- IV – Ocorrências naturais

Figura 1. Diagrama de interligação entre os vectores que afectam a sustentabilidade (Correia, 2005)

De acordo com a Figura 1, a indústria é um agente de grande importância e uma das principais causas da emissão de CO₂ para a atmosfera. A indústria da construção é parte integrante do vector indústria, que se representa na figura anterior, e é essencialmente para a indústria da construção que este trabalho de investigação se dirige.

Regra geral, os factores decisivos para as grandes opções associadas à construção de um edifício são, basicamente, o custo do empreendimento, o tempo de execução e a qualidade dos seus acabamentos. Felizmente, essa filosofia tende a se alterar.

Os principais factores para uma construção sustentável são: redução do consumo de recursos, reutilização de recursos, reciclagem de materiais; protecção dos sistemas ambientais, eliminação dos resíduos tóxicos, aplicação da análise de custos a todo o ciclo de vida e garantia de qualidade (Kilbert, 2008).

Recentemente, em face da consciencialização da sociedade em geral para esses aspectos, assistiu-se a uma intensificação dos critérios de selecção e controlo das acções associadas à construção, sem se verificar um aumento proporcional dos custos totais de construção. A reutilização e reciclagem permitem em simultâneo uma redução das necessidades de materiais para a construção, aliada a uma redução dos custos associados ao tratamento de resíduos.

Tomando como base o princípio da consciencialização da sociedade já referido, pretende-se com este estudo comprovar a possibilidade de obtenção de uma construção isenta de emissão de gases nocivos para a atmosfera no período de vida da edificação. Um edifício com tais características, que seja simultaneamente mais económico e que garanta os padrões de qualidade e conforto exigidos actualmente, será encarado como sendo uma solução alternativa viável e com benefícios ambientais acrescidos. Nesse contexto, com o presente trabalho pretende-se partilhar com a comunidade técnica e científica ligada à arquitectura sustentável os resultados e conclusões alcançados. Segundo Gonçalves (2006), é necessário incentivar e suportar o desenvolvimento de acções para a promoção da sustentabilidade na habitação, por meio de reflexões e do desenvolvimento de propostas inovadoras nesses domínios em nível nacional e internacional.

3. PROPOSTAS ESTUDADAS VISANDO À REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂

As propostas apresentadas e descritas neste trabalho têm como objectivo a redução da emissão de gases poluentes para a atmosfera e/ou a compensação dos mesmos. Neste estudo, as propostas que se

inserir no âmbito da construção propriamente dita são designadas como “directas” e as propostas que visam à compensação da emissão de CO₂, como “indirectas”. Evidentemente, as propostas apresentadas e estudadas poderão na prática ser aplicadas individualmente ou associadas, dependendo apenas da sua aplicabilidade e viabilidade em função do tipo de construção em causa e do tipo de intervenção (construção nova ou reabilitação). Para o caso particular deste trabalho de investigação, será analisada uma construção nova.

Considera-se, então, a existência de quatro vectores fundamentais que poderão ter um papel primordial para alcançar as ditas soluções construtivas convergentes para “CO₂ Zero”. Esses vectores são: o uso de materiais construtivos naturais (descritos anteriormente como materiais disponíveis localmente), o recurso à reutilização de materiais de construção, o sequestro de carbono e a plantação de árvores próximas à construção funcionando como um pulmão “verde”. A Figura 2 representa esquematicamente esse sistema de “forças” proposto, as quais poderão potenciar as soluções para a construção imunes de CO₂.

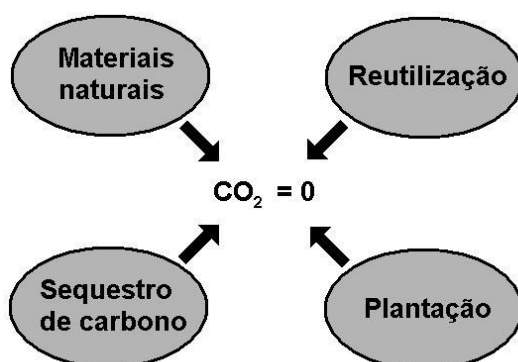


Figura 2. Vectores que potenciam o objectivo CO₂ Zero

3.1. Utilização de materiais naturais

Actualmente, na execução de construções correntes as soluções mais frequentemente utilizadas para o sistema estrutural são pórticos de betão armado ou de aço, paredes de vedação e divisórias em tijolo cerâmico. As matérias-primas utilizadas na produção desses materiais são de origem natural, mas recorrem a avultadas quantidades de energia no processo de fabrico. No entanto, materiais construtivos tradicionais que caíram em desuso com a introdução das soluções em betão armado, tal como a madeira, a pedra e a terra, tem associada a reconhecida vantagem de serem obtidos da natureza, estarem disponíveis localmente, necessitarem de pouca energia e de limitadas transformações para a sua aplicação na construção.

Todos os materiais que serão utilizados na construção na execução dos elementos constituintes dos edifícios, tais como fundações, paredes, pavimentos, cobertura, naturais ou não, têm associado um determinado custo específico para a sua modificação de matéria-prima em material apto para utilizar numa construção, uma quantidade de energia consumida para realizar essa modificação e uma quantidade de gases nocivos libertados para a atmosfera no decurso dessa modificação, os quais resultam das diversas fases do ciclo de vida do material (extração da matéria-prima, transporte, transformação, aplicação, demolição e reciclagem). Vários estudos, como, por exemplo, os de KangHee et al. (2007), CML2 (2000) e Baird et al. (1997), debruçaram-se sobre a definição da quantidade unitária dos parâmetros acima referidos para cada material. Na Tabela 1 estão indicados alguns valores da energia consumida para a transformação de diversos materiais de construção utilizados neste trabalho, propostos por KangHee et al. (2007), CML2 (2000), Baird et al. (1997) e

Gonzalez et al. (2006). Comparando esses valores, comprova-se que existe uma diferença expressiva entre os vários autores.

Esse facto pode ser devido às diferentes abordagens adoptadas pelos autores, nomeadamente pelas eventuais diferenças de análise em termos de períodos de tempo do ciclo de vida dos materiais, ou, ainda, pelas diferenças associadas às técnicas de fabrico (Baird et al., 1997).

Tabela 1. Gasto energético (MJ/kg).

Autor Referência Ano	KangHee KangHee et al. 2007	Leiden CML2 2000	Baird Baird et al. 1997	Alcorn Baird et al. 1997	Gonzalez Gonzalez et al. 2006
Material					
Betão	0,52	0,48	1,99	1,95	1,20
Aço	38,66	----	59,00	8,90	32,00
Argamassa Assent,	0,40	0,88	2,49	1,33	----
Tijolo	2,95	0,15	2,50	----	2,50
Pedra	0,15	----	0,30	0,10	----
Terra	0,05	----	----	----	----
Cimento	3,33	----	8,98	7,80	7,80
Areia	0,05	----	0,04	0,10	----
Blocos de terra	0,06	----	0,42	----	----
Madeira	4,44	----	8,08	1,10	2,00

Consegue-se, no entanto, perceber a clara diferença entre um grupo de materiais que recorrem a transformações com recurso a grandes quantidades de consumo de energia e outro que necessita de pequenas quantidades de energia. O aço e o tijolo são os materiais que mais energia consomem na sua produção, enquanto a terra e a pedra são aqueles que necessitam de menos energia para a sua transformação.

Analogamente, as operações de transformação dos materiais libertam gases poluentes para a atmosfera em função dos trabalhos necessários para a transformação da matéria-prima em material de construção. Assim, tendencialmente, a complexidade e o número de processos de alteração dos materiais têm uma importância acrescida na quantidade gases libertados.

Segundo Gustavsson (2010), o uso de madeira ao invés de betão evita também as emissões de CO₂ relacionadas com a calcinação do cimento.

Num trabalho de investigação desenvolvido anteriormente (Murta et al., 2010), efectuou-se uma comparação de custos, gastos energéticos e de emissões de CO₂ de duas soluções estruturais distintas. Uma das soluções, denominada de solução “Tradicional”, era composta majoritariamente por elementos de betão armado, blocos cerâmicos aglutinados com argamassa de assentamento. A outra solução, denominada de “Sustentável”, era composta por blocos de terra compactada com adição de 10% de, argamassa de assentamento com adição de terra e madeira na estrutura e revestimento dos pavimentos. Após a análise das duas soluções, obtiveram-se valores para os diversos parâmetros de sustentabilidade, por unidade de área de construção, para o modelo estudado, que naquele caso foi uma tipologia de habitação unifamiliar adequada a um agregado familiar composto por três a quatro pessoas.

Os valores unitários dos diversos parâmetros dos materiais apresentam-se na Tabela 2, enquanto os valores globais por área unitária são apresentados na Tabela 3.

Tabela 2. Parâmetros de sustentabilidade dos materiais (Murta et al., 2010).

Material	Unidade	Custo (€/Unidade)	Consumo de energia (MJ/Unidade)	Emissão CO ₂ (CO ₂ /Unidade)
Betão	m ³	50,25	1292,24	99,43
Aço	kg	0,63	38,66	3,72
Argamassa Assent,	m ³	50,45	961,40	63,91
Tijolo	un	0,31	14,78	1,11
Pedra	m ³	15,00	365,26	26,90
Blocos de terra	un	0,15	1,45	0,09
Argamassa (terra)	m ³	48,88	931,48	61,92
Madeira	kg	0,40	4,44	0,38

Tabela 3. Comparação das duas soluções estruturais por parâmetro (Murta et al., 2010).

Parâmetro	Unidade	Tradicional	Sustentável	Melhor solução	Redução (%)
Custo	€/m ²	40,82	38,73	Sustentável	5,14
Gasto energético	MJ/m ²	1623,69	622,60	Sustentável	61,66
Emissão CO ₂	kg-CO ₂ /m ²	135,64	47,77	Sustentável	64,78

3.2. Reutilização de materiais

Muitos dos edifícios devolutos são demolidos e a quase totalidade dos resíduos de demolição é encaminhada para aterros. Pedras, telhas cerâmicas, vigas de madeira e elementos metálicos são exemplos de materiais construtivos passíveis de serem aproveitados e posteriormente reutilizados em outras construções.

Os elementos de madeira, tal como vigas provenientes de edifícios antigos, podem apresentar manifestações patológicas que resultem num desperdício de material superior a 50%, embora seja também referido que existem muitos casos onde esse desperdício não ultrapassa os 10% (Ross; Wang, 2005).

No entanto, segundo Gustavsson e Jelsson (2010), esses desperdícios de madeira podem ser aproveitados como biofuel para obtenção de energia; a energia poupada com este sistema também reduz a emissão de CO₂ comparativamente a combustíveis fósseis.

As principais manifestações patológicas estruturais comumente identificadas nestes elementos são a existência de grandes fissuras, a existência de nós e o apodrecimento dos extremos dos elementos (zonas de apoio).

Relativamente à capacidade resistente da madeira reutilizada: os elementos de madeira antiga analisados no seu estudo apresentaram geralmente uma diminuição do módulo de elasticidade em cerca de 25%, resultante de vários factores, tal como envelhecimento do material, excentricidades resultantes de fraca execução, ligações deficientes, entre outros (Marzo, 2006).

No estudo de Pilt et al. (2009) foi considerada uma diminuição da capacidade resistente da madeira antiga em cerca de 15%. Os valores referidos anteriormente foram adoptados no presente estudo para estimar a redução da capacidade resistente da madeira a reutilizar no caso de estudo. Com essa informação foi possível quantificar os parâmetros de sustentabilidade da madeira reutilizada, que se indicam na Tabela 4, fundamentando neste estudo os valores adoptados na solução idealizada que recorre a materiais reutilizados, denominada por “PBTPMR” na Tabela 5.

Tabela 4. Parâmetros da madeira reaproveitada.

Material	Unidade	Custo (€/Unidade)	Consumo de energia (MJ/Unidade)	Emissão CO ₂ (CO ₂ /Unidade)
Madeira (antiga)	kg	0,002	0,05	0,0035

Tabela 5. Valores actualizados da comparação das soluções estruturais por parâmetro (Câmbio monetário de Junho 2009).

Parâmetro	Unidade	Tradicional	PBTPMN	PBTPMR	Melhor solução
Custo	€/m ²	40,82	38,73	24,15	PBTPMR
Gasto energético	MJ/m ²	1623,69	622,60	433,86	PBTPMR
Emissão CO ₂	kg-CO ₂ /m ²	135,64	47,77	31,67	PBTPMR

Consegue-se, dessa forma, uma redução significativa dos valores quantificados para os parâmetros de sustentabilidade analisados, pelo que se considera que da reutilização de materiais advêm benefícios directos económicos, como a diminuição dos custos dos materiais, diminuição dos prejuízos ambientais e diminuição da emissão de CO₂. Adicionalmente, é possível afirmar que a diminuição da quantidade de resíduos gerará benefícios indirectos, tanto económicos como ambientais.

3.3. Sequestro de carbono

Tal como referido anteriormente, a utilização de materiais naturais possibilita uma diminuição expressiva da quantidade de gases poluentes emitidos para a atmosfera, resultante da pequena transformação que requerem para passar de matéria-prima a material de construção. No entanto, a madeira de construção tem a particularidade de reter CO₂ (através dos seus processos metabólicos) porque deriva de um ser vivo vegetal que absorve CO₂ para realizar a fotossíntese.

Em vários trabalhos de investigação foram efectuados estudos para quantificar a quantidade de CO₂ absorvido pelas árvores, como, por exemplo, em U.S. Energy (1998). Esse procedimento designa-se por sequestro de carbono.

Nem toda a madeira proveniente de uma árvore poderá ser aplicada directamente na construção. É necessário contabilizar os desperdícios nos cálculos do sequestro de carbono aplicado à construção. No presente estudo considerou-se o “pinheiro bravo” como a espécie de madeira aplicada na construção do caso de estudo.

Para essa quantificação considerou-se um período médio óptimo de 45 anos para a idade da árvore, segundo Oliveira (1999), que considera ainda uma altura média de 20 m para a altura do pinheiro. Nesse trabalho é definido ainda que para a construção convém utilizar a madeira com tronco de diâmetro superior a 20 cm. É de salientar que o diâmetro médio do tronco de um pinheiro com 45 anos é de, aproximadamente, 45 cm, de acordo com Pinto (2005). O esquema de aproveitamento adoptado neste estudo é apresentado nas Figuras 3 e 4.

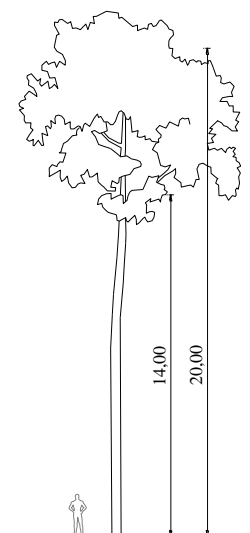


Figura 3. Altura aproveitável (m)

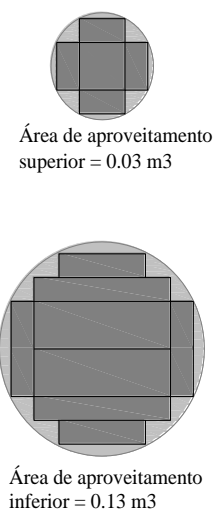


Figura 4. Esquemas de aproveitamento da madeira

De acordo com as premissas referidas anteriormente, é possível definir que o aproveitamento de madeira para construção por árvore é de cerca de $1,12 \text{ m}^3$; a madeira restante, bem como as ramadas da copa podem ser aproveitadas para outro tipo de indústria ou para lenha, no entanto esses aproveitamentos externos à construção não serão considerados.

O sequestro de carbono, segundo U.S. Energy (1998), para um pinheiro com 45 anos será de aproximadamente 1260 kg de CO_2 . Pode-se afirmar, assim, que a madeira para construção tem um sequestro de $1125 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$. Para a madeira de pinheiro, com uma densidade de 580 kg/m^3 , o sequestro de carbono é de $1,94 \text{ kg-CO}_2/\text{kg}$, que é cerca de cinco vezes maior do que a emissão de CO_2 considerada anteriormente ($0,38$).

De acordo com o exemplo do estudo de Murta et al. (2010), numa habitação com $391,50 \text{ m}^2$ de área de construção e com a utilização de $16211,00 \text{ kg}$ de madeira nova, pode-se constatar que o sequestro de carbono por área de construção é de $80,33 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^2$ para madeira nova e de $92,38 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^2$ para madeira reutilizada (não considerando eventuais desperdícios de material na preparação para a fase de reutilização do material). Ao considerar-se, para a madeira reutilizada, que o aproveitamento da madeira se cinge a 50 % da quantidade total de madeira oriunda de demolições, o valor resultante de sequestro de carbono duplica, pois a quantidade de madeira que não foi aproveitada também sequestrou CO_2 durante o seu crescimento.

Com os valores obtidos é possível aferir se a quantidade de materiais naturais, incluindo a madeira, a aplicar numa construção comparativamente a uma solução com materiais correntes (betão armado, por exemplo) apresenta uma redução das emissões totais de CO_2 associadas.

3.4. Implementação de um “pulmão verde”

Poderá surgir a questão da aplicabilidade do sequestro de carbono à madeira para construção, pois, se esta for reutilizada diversas vezes, o sequestro não poderá ser considerado a partir da segunda reutilização, uma vez que já foi contabilizado na primeira. Essa questão levou ao estudo e desenvolvimento de uma solução alternativa e/ou complementar ao sequestro de CO_2 associado aos materiais de construção.

Relembrando os resultados obtidos anteriormente, uma árvore sequestra 1260 kg de CO_2 durante a sua vida. Se, alternativamente ao sequestro directo de CO_2 do material, se considerar um sequestro

indirecto recorrendo à plantação de árvores para compensar o défice, pode-se correlacionar directamente a quantidade estimada de emissão de gases poluentes para a atmosfera resultantes do fabrico de materiais de construção com o sequestro unitário de cada árvore. Já existem acções, medidas e até mesmo leis que implementam esta medida como meio de combate ao efeito de estufa (por exemplo: [www 1](#), [www 2](#) e [www 3](#)).

4. CASO DE ESTUDO

Como caso de estudo, foi idealizado um edifício tipo, localizado na cidade da Figueira da Foz, em Portugal. A implantação do edifício é assumida em zona rural com envolvente de terrenos agrícolas, a uma altitude de 50,00 m.

Neste estudo considerou-se uma habitação unifamiliar adequada a um agregado familiar composto por duas pessoas. Para isso, assumiu-se que o edifício terá 165 m² de área bruta de construção, onde a distribuição de espaços de uso social e de uso privado se concentrará apenas num único piso.

Aplicando a nomenclatura e os valores para a quantidade dos diversos materiais constituintes da solução construtiva (Tabelas 2, 3, 4 e 5) obtidos e apresentados anteriormente por Murta et al. (2010) a este caso de estudo, tomando em conta as propostas para a redução da emissão de CO₂ apresentadas anteriormente e considerando que a quantidade dos referidos materiais será equivalente em termos de quantidade por unidade de área, obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 6 para os seguintes cenários:

- “Tradicional”: solução em elementos de betão armado e alvenaria de tijolo cerâmico;
- “PBTPMN”: solução em paredes de adobe de terra, argamassa a base de terra, pedra e madeira;
- “PBTPMR”: solução em paredes de adobe de terra, argamassa a base de terra, pedra e madeira reutilizada (proveniente de demolições);
- “PBTPMN + Sequestro de CO₂”: Solução PBTPMN com o acréscimo do sequestro directo de CO₂ na madeira para construção;
- “PBTPMR + Sequestro de CO₂”: Solução PBTPMR com o acréscimo do sequestro directo de CO₂ na madeira para construção.

Em seguida, apresentam-se os valores obtidos para as soluções apresentadas e também para a comparação entre soluções.

Tabela 6. Emissão de CO₂ para o caso de estudo.

Proposta	Emissão CO ₂ (kg-CO ₂ /m ²)	Emissão Total (kg-CO ₂)	Emissão comparativa (%)
Tradicional	135,64	22380,60	---
PBTPMN	47,77	7882,05	35%
PBTPMR	31,67	5225,55	23%
PBTPMN + Sequestro de CO ₂	-80,33	-5372,40	-24%
PBTPMR + Sequestro de CO ₂	-92,38	-10017,15	-45%

Nota: A utilização do sinal (-) corresponde a um benefício em relação ao elemento de comparação.

Da análise dos resultados observa-se que, pelo simples facto de se aplicar materiais naturais na construção, a emissão de CO₂ é reduzida drasticamente, como esperado. Se, adicionalmente, for considerado o sequestro directo aplicável à madeira, a quantidade de CO₂ emitido é menor que a quantidade de CO₂ sequestrado. Tal situação só é possível porque a análise das emissões foi efectuada apenas contemplando os materiais de construção, não entrando em conta as emissões associadas à própria mão de obra para a construção, à manutenção do edifício e à demolição.

Nesse caso, se o sequestro directo não fosse suficiente, poder-se-ia recorrer à proposta “pulmão verde” para se obter o objectivo de “CO₂ Zero”.

Para este caso de estudo, e recorrendo ao vector “pulmão verde”, analisou-se o número necessário de árvores para compensar a emissão de CO₂ para uma construção “Tradicional”, que corresponde à situação mais gravosa. Considerando o valor obtido anteriormente de 1260 kg de CO₂ para o sequestro total de uma árvore, seria necessário plantar 18 árvores e permitir o seu crescimento até aos 45 anos para poder anular eficientemente a quantidade total de gases tóxicos emitidos para a atmosfera relativos à transformação da matéria-prima em material de construção. Comparativamente, a solução “PBTPMN” necessitaria de seis árvores nessas condições, enquanto a solução “PBTPMR” necessitaria apenas de quatro árvores.

No entanto, a utilização de materiais naturais, entre eles a madeira, é uma solução que apresenta um benefício efectivo na escolha dos materiais de construção a aplicar na execução de um edifício.

Assim, e associando os vectores principais de convergência anteriormente referidos às soluções aqui apresentadas, podemos concluir que todas as soluções alternativas à solução tradicional apresentadas incorporam materiais naturais e, consequentemente, mais sustentáveis. Adicionalmente, as soluções que fomentam utilização de materiais reaproveitados (PBTPMR) apresentam vantagens em relação à utilização de materiais novos (PBTPMN) no que respeita à emissão de gases nocivos para a atmosfera. Em duas soluções apresentadas foi incluído o sequestro de CO₂ para contabilização da emissão de gases, apresentando igualmente vantagens em relação às soluções equivalentes que não contabilizam esse sequestro.

Assim, e logicamente, a solução que apresenta mais-valias é aquela que recorre à utilização de materiais naturais, contempla o reaproveitamento de materiais e também o sequestro de CO₂. Tal solução é a denominada neste estudo como “PBTPMR + Sequestro de CO₂”, com um benefício de 45% relativamente a uma solução tradicional recorrendo a materiais tradicionais. Como já referido, o quarto vector foi considerado para a neutralização do remanescente entre o total de sequestro de CO₂ e o total de emissões que são efectuadas na execução da totalidade do edifício.

Considera-se, assim, que a interligação desses vectores potencia um tipo de construção mais sustentável, capaz ainda de anular por completo os malefícios decorrentes do sector da construção, neste caso aplicado à construção unifamiliar, mas que se estima ser de possível aplicação a outro tipo de construções ou sectores da sociedade.

5. CONCLUSÃO

Foi discutida a interligação dos vectores que influenciam na sustentabilidade na construção, realçando a importância da indústria da construção no âmbito da emissão de gases nocivos para a atmosfera. Com o objectivo de encontrar uma metodologia capaz de tornar uma construção corrente isenta de CO₂, foi proposto um sistema de avaliação composto por quatro vectores. Estabeleceu-se, então, uma hierarquia de propostas de estratégias, a referir: utilização de materiais naturais, reutilização de materiais, análise do sequestro de carbono, implementação de um “pulmão verde”.

Definiram-se propostas numa tentativa da redução da emissão de CO₂ para os materiais de construção de um edifício. As propostas foram: o uso de materiais construtivos naturais, o recurso à reutilização de materiais de construção, o sequestro de carbono e a plantação de árvores satélites à construção funcionando como um “pulmão verde”. Analisou-se, por isso, a quantidade efectiva de carbono sequestrado nos materiais naturais e concluiu-se que a madeira sequestra quase o dobro do seu peso em carbono durante a sua vida útil e que é cerca de cinco vezes inferior que a quantidade de CO₂ emitida para a sua transformação em material de construção.

Como solução alternativa já indicada, considerou-se a plantação de árvores de forma a compensar toda a emissão de CO₂ dos materiais de construção. Concluiu-se que para cada árvore sequestra cerca de 1260 kg de CO₂ durante a sua vida.

Para efectuar uma análise comparativa de todos estas propostas e aplicando os valores obtidos, considerou-se como caso de estudo uma moradia unifamiliar tipo.

Dos resultados concluiu-se que a solução “PBTPMN” emite cerca de 35% da quantidade total de emissões de CO₂ associadas à solução “Tradicional” e que a solução “PBTPMR” emite cerca de 23%. Se for contemplado o sequestro de carbono dos materiais, a solução “PBTPMN” tem um “benefício” de 24%, enquanto que a solução com reutilização tem um “benefício” de 45%.

Alternativamente, considerou-se a plantação de árvores, como foi já referido. Para a solução sem recurso a materiais naturais seria necessário plantar 18 árvores; para a solução “PBTPMN”, seis árvores e, para a solução com materiais reutilizados (“PBTPMR”), apenas quatro árvores.

Assim, as opções tomadas na escolha dos materiais de construção influenciam significativamente na quantidade de gases poluentes emitidos para a atmosfera. A opção por materiais naturais tem associada uma diminuição das emissões, a qual é ainda mais acentuada se forem aplicados materiais reutilizados, a partir das demolições.

Ao considerar a madeira como material principal de construção, podemos afirmar que grande parte do CO₂ associado à construção foi já absorvido pelo próprio material a usar, eventualmente compensando a emissão referente à mão de obra, aos materiais de acabamento e aos trabalhos de manutenção. Estes trabalhos não foram considerados neste estudo.

Um estudo global, mais abrangente e completo, poderá contribuir para a definição e produção de habitações unifamiliares isentas de emissões de CO₂. As propostas apresentadas e estudadas neste trabalho podem facilmente ser extrapoladas para os outros tipos de construção, em particular, edifícios de habitação multifamiliar. Desse modo, a indústria da construção poderá contrariar a tendência crescente de impacto ambiental e contribuir para que a indústria em geral passe a ter um impacto menos nocivo para o meio ambiente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAIRD, G.; ALCORN, A.; HASLAM, P. *The energy embodied in building materials*. New Zealand, IPENZ Transactions, 1997.

BERNARDES, A. et al. Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 65-76, 2008.

BUSON, M.; VARUM, H.; SPOSTO, R.M. Performance improvement of adobe blocks with addition of cellulose pulp derived from cement sacks recycling: KRAFTTERRA. FEUP, University of Porto, Porto, Portugal,, (ed.) A.J.M. Ferreira. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE STRUCTURES, 15th. ICCS15, Paper Ref. 136. 15 a 17 de junho de 2009.

CARVALHO, J. ET AL. Construções em tabique na região de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, (ed.) Humberto Varum, Francisco Carvalho, Aníbal Costa, Alexandre Bertini, Petr Stepánek. ISBN: 978-989-95695-3-9. CINPAR 2008. 25-28 Junho 2008.

CML2, 2000, Disponível em: < www.cmlca.eu >

<http://www.pre.nl/simapro/impact_assessment_methods.htm#CML2> Acesso em: 20 Fev. 2010.

CORREIA, S. Materiais e técnicas para uma construção sustentável; 2005, Aveiro Domus, DEM-UA., Disponível em: <www.ctcv.pt/> Acesso em: 20 fev. 2010.

FARIA, I. et al. Monitorização da estrutura de madeira da cobertura da piscina municipal de Mirandela, Portugal, (ed.) H. Varum, F. Carvalho, A. Costa, A. Bertini, P. Stepánek. ISBN: 978-989-95695-3-9, CINPAR 2008. 25-28 Junho 2008.

GONÇALVES, J.; DUARTE, D. Arquitectura sustentável: uma integração entre ambiente, projecto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 51-81, 2006.

GONZALEZ, M.; NAVARRO, J. Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environment impact. *Buidind and Environment*, 41, p. 902-909, 2006.

GUSTAVSSON, L.; JOELSSON, A.; SATHRE, R. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building. *Energy and Buildings*, 42, p. 230-242, 2010.

GUSTAVSSON, L.; JOELSSON, A. Life cycle primary energy analysis of residential buildings. *Energy and Buildings*, 42, p. 230-242, 2010.

MARZO, A; Methodology for the analysis of complex historical wooden structures. Poland, Pollack periodica, 2006.

MIRANDA, L.; ÂNGULO, S.; CARELLI, É. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, 2009.

MURTA, A. et al. Advantages of using raw materials in low cost sustainable structural solutions for single-family buildings. 2010. in: Portugal SB10, Sustainable Building, Affordable to All, Low Cost Sustainable Solutions”; Edited by Bragança L.; Pinheiro M.; Mateus R.; Amoêda R.; Almeida M.; Mendonça P.; Cunha A.; Dias A.; Farinha F.; Gervásio H.; Brito J.; Guedes M.; Ferreira V.; 1st edition: March 2010, Portugal; ISBN 978-98996543-1-0, Chapter 3: Low cost sustainable building solutions, pp. 281-287.

OLIVEIRA, A.; MOURA, P.; PINTO, M. *Boas práticas florestais para o pinheiro bravo*: manual, Portugal, 1999, Molográfica SA.

KANGHEE, L. et al. The estimation of the functional unit on energy consumption and CO₂ emission concerned with construction of building. South Korea, 2007, in: SB07 Seoul Conference.

KILBERT, C. Sustainable construction – Green building designs and delivery. New Jersey, USA, 2008. John Wiley & Sons, Inc; Hoboken.

PILT, K. ET AL. *Diagnosis of Timber Structures and Archaeological Wood of Cultural Heritage*. 2009. Disponível em: <www.woodculther.com> Acesso em: 20 fev. 2010.

PINTO, J.; Blockley D.; WOODMAN, N. The risk of vulnerable failure. *Journal of Structural Safety*, n. 24, p 107-122, 2002.

PINTO, I; USENIUS, A; PEREIRA, H. *O potencial do pinheiro bravo (Pinus pinaster Ait.) para a produção de peças sólidas de madeira de cerne*. Lisboa: Centro de Estudos Florestais, 2005.

ROOS, J.; WANG, X. Condition Assessment of timbers. *Structure Magazine*, Sept. 2005.

U.S. ENERGY. Method for calculating carbon sequestration by trees in urban and suburban settings. 1998. U.S. Department of Energy.

WWW 1. Disponível em: <<http://cosmo.uol.com.br/noticia/50576/2010-04-08/plantio-de-arvores-para-compensar-emissao-de-co2.html>> Acesso em: 20 fev. 2010.

WWW 2. Disponível em: <<http://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/lenoticia.php?id=85796>> Acesso em: 20 fev. 2010.

WWW 3. Disponível em: <<http://www.portaleducacao.com.br/educacao/noticias/38463/para-compensar-emissao-de-co2-termoeletricas-vao-plantar-arvores#>> Acesso em: 20 fev. 2010.